

文章编号: 2096-1618(2018)06-0667-08

北京地区的地闪分布及回击峰值电流强度特征

张元龙^{1,2}, 周筠珺^{1,3}, 王东方⁴, 田野⁴, 袁善锋⁴

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 辽宁省气象信息中心, 辽宁 沈阳 100166; 3. 南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 4. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

摘要:针对北京地区开展闪电探测研究,分析闪电分布特征及回击峰值电流强度,不仅能够深入了解北京地区闪电活动规律,而且对重点区域的雷电灾害防护提供实际的参考价值。利用 BLNet 2015–2017 年的闪电定位资料和闪电电场变化资料,基于传输线模式对雷电流进行反演估算,统计分析了北京地区的地闪分布及回击峰值电流强度特征。分析结果表明:北京地区闪电发生频次最高的时段为 20:00–23:00,地闪约占总闪的 25.1%,其中正地闪约占总地闪的 21.1%。正地闪回击峰值电流强度算术平均值为 25.2 kA,几何平均值为 15.2 kA,负地闪回击峰值电流强度算术平均值为 14.2 kA,几何平均值为 9.9 kA;正、负地闪首次回击峰值电流强度算术平均值为 17.6 kA,几何平均值为 13.2 kA,正地闪首次回击峰值电流强度算术平均值为 27.0 kA,几何平均值为 17.7 kA,负地闪首次回击峰值电流强度算术平均值为 15.1 kA,几何平均值为 12.2 kA;正地闪继后回击峰值电流强度算术平均值为 22.2 kA,几何平均值为 11.8 kA,负地闪继后回击峰值电流强度算术平均值为 13.2 kA,几何平均值为 9.6 kA;对地闪首次回击和继后回击峰值电流强度进行统计分析,发现有 37.5% 多回击地闪至少有一次继后回击峰值电流强度大于首次回击峰值电流强度,地闪继后回击峰值电流强度大于首次回击峰值电流强度的继后回击数占总的继后回击数的 24.7%;峰值电流强度绝对值 > 100 kA 的地闪主要分布在北京东部、东北部、西部、北部的山区以及北京城区。

关键词:天气学;雷暴;北京地区;地闪;回击;峰值电流

中图分类号:P446

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.06.012

0 引言

地闪是云与大地之间发生的一种强烈的放电现象,常伴有高电压、大电流和强电磁辐射等特征。北京地区地处华北平原北部,地形西北高,东南低,东北、西、北三面环山,山地地形的动力抬升作用,夏季高温多雨,雷暴云和闪电经常发生。另外,近年城市化快速发展,城市热岛效应以及城市高大建筑物群都有可能影响北京地区的闪电活动。北京作为中国政治、经济、文化中心,常住人口数量大,人口密集,闪电一旦造成危害,势必会造成较大的社会影响和经济损失。因此,分析北京地区的闪电活动特征,是一个具有现实意义的科学问题。

闪电放电通道中峰值电流强度的大小表征闪电的强弱。闪电放电通道中峰值电流的获取主要有两种方法:一种是直接测量方法,该方法主要是利用高大建筑

物或构筑物易于被雷击的特点或者基于人工引雷实验,安装雷电电流测量装置对雷电流进行直接测量,该方法虽然为雷电流的直接获取提供了独特的技术手段,但样本数有限。Romero 等^[1]统计了 2010 年和 2011 年对流旺季桑蒂斯塔站的上行负地闪,两年共测得 167 次闪电,得到的最大峰值电流为 26.5 kA;另一种是利用闪电探测和定位资料得到的地闪回击通道中电流值大小。很多学者利用不同的闪电探测和定位系统对不同地区的闪电强度特征进行了大量的分析和研究。Cummins 等^[2]对升级后的美国国家闪电网(NLDN)的探测资料分析发现,美国负地闪首次回击峰值电流均值为 18.8 kA,中值为 15.2 kA。Orville 等^[3]分析了南美闪电探测网络 2001–2009 年的闪电资料,9 年间负地闪的首次回击平均峰值电流强度为 16.1 kA,正地闪首次回击峰值电流强度为 25.7 kA。Antonescu 等^[4]利用罗马尼亚国家闪电探测网络 2003–2005 年和 2007 年的闪电探测资料,分析发现地闪主要集中于 5–9 月,12–1 月地闪发生的频次最少,在 5 月正地闪比例最高达 25%,8 月正地闪比例达 23%,地闪频次最多的时间段是 12:30–14:30 (UTC),频次最少的时间段为 06:00–08:00 (UTC)。

收稿日期:2018-03-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划 973 计划资助项目(2014CB441401、2014CB441403);国家科技支撑计划资助项目(2015BAC03B00);国家自然科学基金资助项目(41575037);北京市自然科学基金重点资助项目(8141002);四川省教育厅资助项目(16CZ0021、17ZB0087)。

郅秀书等^[5]利用三站地闪定位系统对北京地区的地闪特征进行研究,对 1988 年 8 月探测到的 1 万多个地闪资料分析发现,北京地区的负地闪峰值电流为 -21.7 kA,正地闪为 61.9 kA,正闪强度近似为负闪的 3 倍,正闪占地闪总数的 1.7%,地闪峰值出现在北京时 16:00-17:00。李京校等^[6]利用具有总闪观测能力的 SAFIR3000 在北京及周边地区的 2005-2007 年的观测资料,认为地闪高发时段、月份、地闪高值区和云闪基本类似,其中高发时段在 15:00-次日 00:00,峰值在 19:00,其高发月份峰值在 7 月,北京地区正地闪平均电流峰值强度为 33.4 kA,负地闪平均电流峰值强度为 29.6 kA,地闪平均回击次数为 1.57 次。李如箭等^[7]利用北京地区 2008-2010 年的 ADTD 地闪定位系统资料分析指出,正地闪次数占总地闪次数的 6%,地闪的平均电流峰值强度为 24.6 kA,地闪频次最高月份为 6-8 月,且地闪频次最高的区域主要集中在密云、平谷、顺义东北部和房山西部。张阳等^[8]利用闪电定位资料和电场快慢变化资料,对北京地区正地闪的时间分布规律及波形特征进行统计分析,发现正地闪分布较大频次出现在 5-7 月,15:00-21:00 具有较高的比例,多回击正地闪占正地闪总数的 3.89%,归一化到 100 km 的回击场强峰值为 13.66 V/m。武智君等^[9]利用北京地区 2011 年两次雷暴过程的多站 GPS 同步闪电地面电场变化观测资料,定量研究了负地闪回击中和的电荷源位置和电荷量,得到单次负地闪回击中和的电荷量平均为 8.6 ± 5.2 C。黎勋等^[10]发现 421 次负地闪首次回击和 789 次继后回击归一化到 100 km 的初始峰值电场平均值分别为 7.2 V/m 和 5.0 V/m,70 次正地闪首次回击为 11.2 V/m。虽然目前对北京地区的地闪回击强度包括回击峰值电流、归一化到 100 km 的峰值电场以及回击中和的电荷量等有少量研究,但是大多没有区分首次回击和继后回击,所用探测技术不同,有些分析资料量较少,特别是有些闪电探测系统未经过严格的标定,因此得到的地闪回击峰值电流强度的准确性需要进一步的检验。为了获得北京地区准确的闪电峰值电流强度特征,利用 BLNet 定位到的北京地区闪电定位资料,首先对 BLNet 各个测站进行环境影响因子订正,再利用订正后的闪电辐射场对闪电峰值电流强度进行了计算,最后对所得到的结果与已有结果进行对比分析。

1 资料和方法

1.1 闪电资料

所使用的资料是北京闪电探测和定位网 (Beijing

lightning network, BLNet) 2015-2017 年具有高时间分辨率的闪电快电场变化资料,闪电快电场变化仪探测频段为 1.5 kHz ~ 2 MHz,时间常数为 0.1 ms,该系统共计由 16 个观测站组成,东西跨度 110 km,南北跨度 120 km,能够覆盖到北京及周边的大部分地区,实现对北京地区当顶雷暴或者过境雷暴天气过程的闪电进行实时定位^[10-12],由于华北地区每年雨季来临的时间大不相同,所以 BLNet 监测闪电的时间段主要集中在每年的 6-9 月,个别年份在 5 月和 10 月也有观测。根据黎勋等分别统计的正、负地闪放电波形特征,主要包括回击间隔、10% ~ 90% 上升时间、下降时间、半峰值宽度、过零时间和负反冲深度等参数,设计了识别正、负地闪回击脉冲与云闪脉冲的算法。图 1 是 2015 年以来 BLNet 各观测站点分布示意图。BLNet 的中心站是 DQS 站 (大气所),位于北京中国科学院大气物理研究 40 号楼楼顶。根据 Srivastava 等^[13]的分析评估,BLNet 对总闪的探测效率为 93.2%,地闪的识别效率 73.9%。

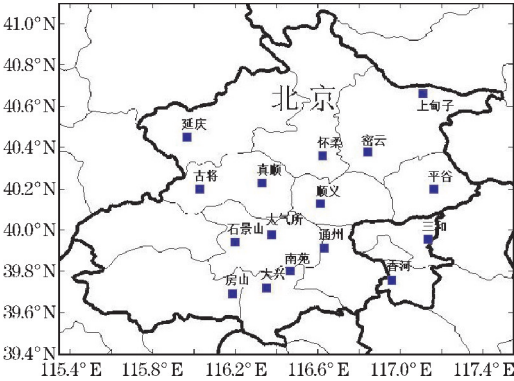


图 1 2015 年以来 BLNet 各观测站点分布示意图

1.2 资料处理方法

对地闪放电通道中电流强度的反演依据传输线模式。假定闪电放电通道垂直于地面,根据传输线模式^[14],闪电产生的地面电场变化 $E(r,t)$ 和回击电流 $i(0,t-r/c)$ 遵循如下关系

$$i(0,t-r/c)=\frac{2\pi\cdot\eta\mu_0c^2E_v(d,t)}{v}$$

(1)

其中 μ_0 为真空介电常数, c 为光速, r 为地闪回击点和测站之间的距离, v 为地闪回击向上传播的速度。通常假定地闪回击速度为一个常数,如为光速 c 的 1/3。可见如果能够定量确定回击在测站产生的地面电场强度和回击距测站的距离 r ,就可以根据式 (1) 对地闪回击的放电电流进行估算。

利用闪电快电场变化仪通过实验室标定可以测量得到天线位置处闪电引起的电场变化。但是由于闪电放电产生的电磁辐射场在传播过程中产生一定衰减,测站及周边环境也会对闪电电磁辐射场产生影响,使测

量到的电场变化不能真实反映闪电在该站产生的电场变化强度。为了从快天线的测量信号中得到定量的闪电辐射电场,首先需要对环境影响系数进行订正。假设快电场变化仪测量到的闪电引起的大气电场变化 E_m , 台站环境影响因子系数 a , 可以得到

$$E_{\text{ground}} = a \times E_m \tag{2}$$

其中 E_{ground} 为闪电放电在测站产生的地面电场变化, 下面先确定测站环境影响因子。

2 测站环境影响因子及验证

对于一次闪电放电过程, 同时探测到此次闪电的所有测站反演出闪电放电通道中的电流强度应该是相等的。通过选取一个不受环境影响的测站作为基准台站, 即该基准台站的环境影响因子系数 $a = 1$, 则可以得到不同台站相对基准站的环境影响因子。据此, 每个测站均可根据所测量得到的电场变化反演得到一个回击电流强度。将多个台站分别估算出的闪电放电通道中电流强度取其平均值, 作为最终估算的闪电放电通道中电流强度的大小。图 2 是 BLNet 基准站的实验设备架设图, 在该基准站架设了闪电快、慢电场变化仪, GPS 时钟以及甚高频天线, 该基准站周边环境开阔, 无高大建筑物遮挡, 并且电磁环境较好, 实验设备全部架设在地面, 天线距离地面大约 60 cm, 将快电场变化仪测得的闪电产生的电场变化折合到地面, 就可以间接估算出地闪回击峰值电流强度的大小。以该基准站所反演的回击峰值电流强度作为真值, 可以求出不同台站相对基准站的台站环境影响因子系数大小。为了保证结果的可靠性, 初步数据的查找和对比



图 2 BLNet 基准站的实验设备架设图

通过人工来完成。由于 16 个测站所测到的闪电数据量大, 选择 2015 年 7 月 26 日, 2015 年 7 月 27 日, 2015 年 7 月 29 日, 2015 年 8 月 7 日, 2015 年 8 月 31 日, 2016 年 6 月 9 日共计 6 次雷暴过程的实测地闪数据进行统计, 比较发现各测站相对所选择的基准台站而言, 环境影响系数大多分布在 0.7 ~ 1.5, 但放置在大气所楼顶的测站环境影响因子则可达 2.63 倍。考虑各个测站的环境影响因子后反演得到的基于本测站的各个闪电峰值电流强度大小, 然后与 BLNet 的最终输出电流峰值进行对比。图 3 给出了大气所 DQS、怀柔 HR、顺义 SY 和真顺 ZS 这 4 个代表测站的对比结果。从整体对比结果来看, 各台站的拟合曲线的斜率均接近于 1, 各测站的拟合优度均大于 0.9, 但是 SDZ 站和 XH 站等测站的拟合曲线的截距大于 1。进一步查看测站的原始数据波形发现这几个测站的无线电背景噪声较大, 电磁干扰可能造成本站电流反演结果的误差, 因此在 BLNe 电流反演时尽量不使用这几个测站的数据。

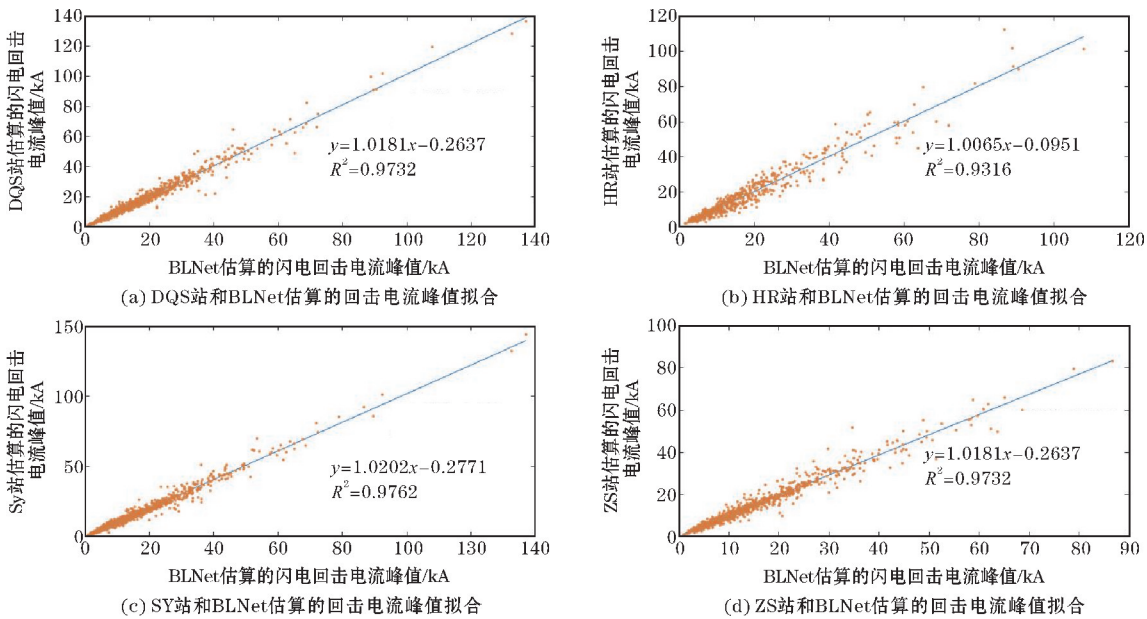


图 3 大气所 DQS、怀柔 HR、顺义 SY 和真顺 ZS 代表测站订正后的电流反演值和 BLNet 的最终电流输出值之间的对比图

3 地闪回击分布特征和回击电流峰值特征

主要是针对地闪峰值电流强度特征进行分析,一是因为地闪放电过程主要是云中电荷对地面或地面上的建筑物放电,而人类的各种生产生活等活动主要集中在地面,因此地闪放电过程对人类的影响更大;二是因为云闪是云体内部或云与云之间的放电过程,云体内部的微物理变化很复杂,时刻都在变化,并且目前国际上对云闪的峰值电流强度的估算并没有统一的标准,基于以上两点原因,仅对 BLNet 监测的地闪进行峰值电流强度特征分析。闪电的聚类标准选取卡方 ≤ 5 的 4 站及 4 站以上同步监测的闪电定位点,以第一个辐射源为参考点,将 1.5 s 之内相邻两次闪电回击定位点之间的距离差 ≤ 15 km 并且时间差 ≤ 400 ms 定义为一次闪电,即第一个辐射源的回击点和时间为参考,如果后续回击与辐射源之间的距离差和时间差同时满足上述条件时,将这些回击视为一次地闪,否则视为两次或多次闪电。

3.1 北京地区的地闪分布特征

在所分析的区域, BLNet 3 年探测到闪电(云闪和地闪)共计 19.1 万余次,其中地闪占总闪的 25.1%,正地闪占总地闪的 21.1%。首先对总闪和地闪的日变化特征进行分析,图 4 给出了总闪和地闪的日变化分布图,从图中可以发现,在 3 年期间 BLNet 监测总闪和地闪的日变化呈现“双峰”的分布态势,其峰值分布在 20:00–23:00 和 01:00–04:00 两个时间段,05:00–14:00 闪电的变化比较平缓,15:00–17:00 闪电发生频次呈现逐渐增加的趋势,17:00–19:00 闪电发生频次趋于平缓。

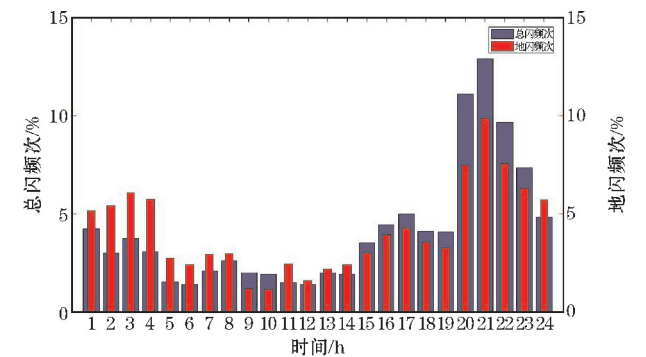


图 4 总闪及地闪日变化统计图

图 5 是正、负地闪首次回击及继后回击统计图。2015–2017 年 BLNet 监测到回击过程总计 8.8 万余次,

其中正回击约占总回击的 18.4%,负回击占 81.6%;正地闪平均回击次数的几何平均值为 1.5 次,算术平均值为 1.8 次,负地闪平均回击次数几何平均值为 1.7 次,算术平均值为 2.3 次。有 69.6% 的正地闪仅包含首次回击,仅有 30.4% 的正地闪含有继后回击,正地闪回击次数最大值为 11 次。和正地闪相比较,负地闪含有继后回击的比例相对高一些,有 36.1% 的负地闪包含继后回击,有 63.9% 的负地闪仅有首次回击,负地闪最大的回击数是 25 次。

表 1 是不同学者对不同地区的正、负地闪回击情况的统计表,文中得到的正、负地闪最大回击数较李京校^[6]和郗秀书^[5]得到的结果大很多,正、负地闪平均回击次数较李京校利用 SAFIR 得到的结果大一些,较郗秀书^[15]利用慢天线得到的兰州地区的负地闪平均回击次数少一些,得到的负地闪仅含首次回击的比例与郗秀书和李京校的研究结果很相近,但是得到的正地闪仅含单次回击的比例结果低,比张阳等^[8]得到的正地闪仅含单次回击的比例低很多。采用不同探测系统的差别以及闪电聚类标准的不同可能会对结果造成一定的影响。再者, BLNet 作为一个小型的局域网,其探测闪电的效率更高,可以探测到更多的回击过程,其结果与实际情况更接近。

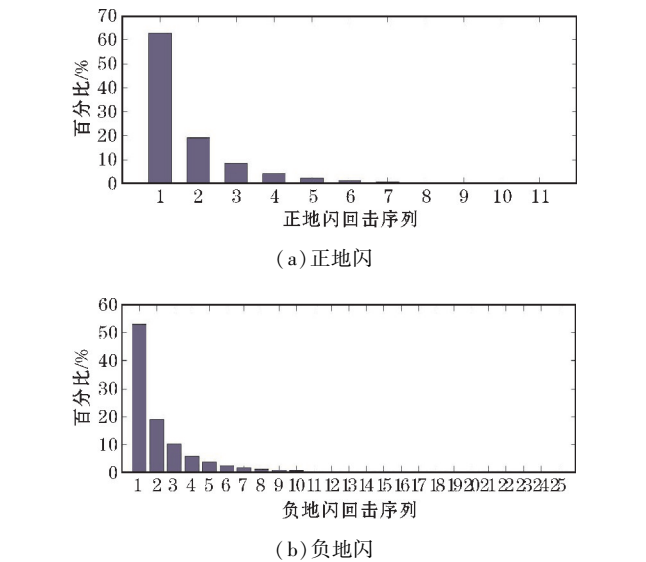


图 5 正、负地闪首次回击及继后回击数分布图

3.2 北京地区的地闪峰值电流强度特征

图 6 是正、负地闪回击(首次回击和继后回击)峰值电流强度分布图,正负地闪的回击电流分布都呈明显的对数正态分布。图 6(b)是负地闪回击峰值电流强度分布图,从图中可以看,负地闪回击强度在 0~10 kA 和 10~20 kA 的回击最多,约占总回击的 80%,仅有 0.2%

的负地闪回击峰值电流强度大于100 kA,负地闪回击算数平均值为14.2 kA,几何平均峰值电流强度为9.9 kA;图 6(a)是正地闪回击峰值电流强度分布图,从图中可以看出,正地闪回击强度主要集中在 10~30 kA,约占正地闪回击总数的71.6%,正地闪回击电流强度的算数平均值为 25.2 kA,几何平均峰值电流强度达到了

15.2 kA,对回击峰值电流强度在100 kA以上的正地闪进行统计分析,发现约有2.7%的正地闪回击强度在 100 kA以上,该比例比负地闪大得多,虽然正地闪在地闪中发生的比例为21.1%,但是其回击峰值电流强度更大,对人类生产生活的影响也更大。

表 1 不同学者对正、负地闪回击分布研究结果的对比

文献类型	资料	正地闪平均回击次数	负地闪平均回击次数	正地闪单次回击比例	负地闪单次回击比例	正地闪最大回击数	负地闪最大回击数	地点
文中研究	快电场资料	1.8	2.3	69.6%	63.9%	11	25	北京
文献[6]	SAFIR3000	1.19	1.64	87.24%	65.22%	6	13	北京
文献[8]	闪电定位快慢电场	N. A.	N. A.	96.1%	N. A.	N. A.	N. A.	北京
文献[15]	慢电场资料	N. A.	3.76	87.0%	60.2%	N. A.	N. A.	兰州
文献[5]	DF 和 PA	N. A.	N. A.	82.9%	30.7%	5	11	北京

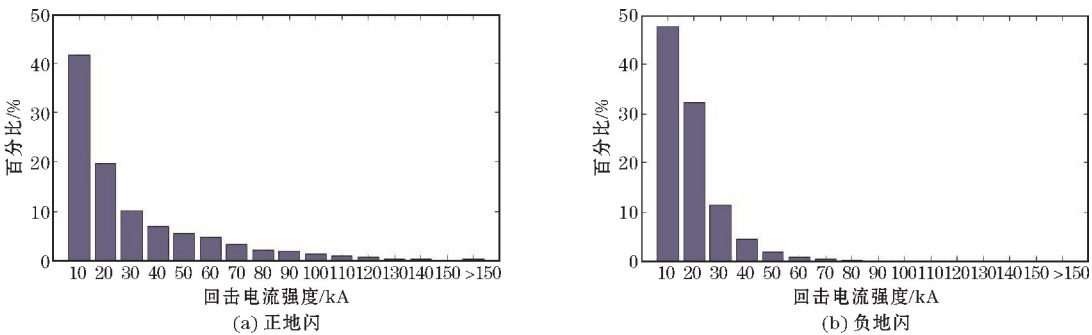


图 6 地闪回击峰值电流强度分布图

图 7 是正、负地闪首次回击峰值电流强度分布图。图 7(b)是负地闪首次回击峰值电流强度统计图,首次回击峰值电流强度算术平均值为15.1 kA,几何平均峰值电流强度为12.2 kA,从图中可以看出负地闪峰值电流强度在 0~10 kA负地闪最多,负地闪峰值电流强度大于50 kA的负地闪仅占负地闪总数的2.1%,负地闪首次回击最大峰值电流强度为241.2 kA。从图 7(a)可以看出,正地闪首次回击峰值电流强度在20 kA以内的数量最多,约占总正地闪的57.8%,正地闪首次回击峰值电流强度大于 100 kA的正地闪占正地闪总数的2.9%,正地闪首次回击

峰值电流强度算术平均值为27.0 kA,首次回击峰值电流几何平均值为17.7 kA,正地闪首次回击最大峰值电流强度为244.1 kA。正、负地闪首次回击峰值电流强度算术平均值为17.6 kA,几何平均峰值电流强度是13.2 kA。正地闪首次回击平均峰值电流强度是负地闪首次回击平均峰值电流强度的1.8倍,该结果比李如箭等^[7]利用 ADTD 资料和郅秀书等^[5]利用 DF 和 PA 得到的闪电资料,得出的北京地区正地闪强度近似为负地闪强度的 3 倍要小很多,可能是因为 BLNet 为局域网,可以探测到更多弱的回击过程,与实际情况更接近。

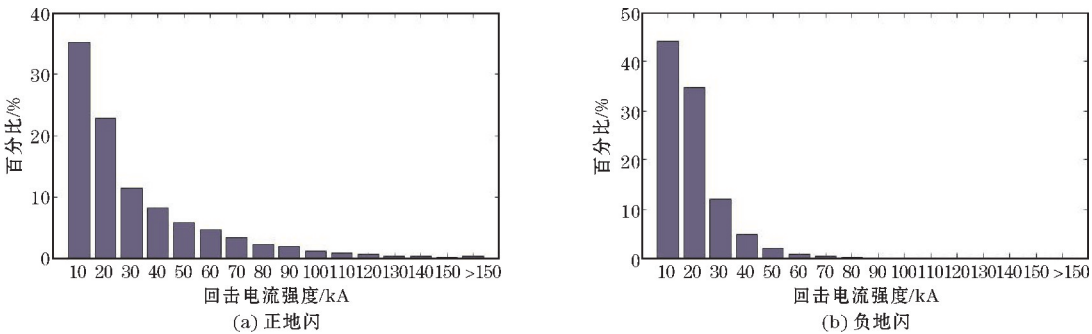


图 7 正、负地闪首次回击峰值电流强度分布图

图 8 是正、负地闪继后回击峰值电流强度分布,从图中可以看出负地闪继后回击峰值电流强度小于 30 kA 的回击占总继后回击的 92.2% 左右,回击峰值电流强度大于 100 kA 的约占 0.2%,负地闪继后回击峰值电流算术平均值为 13.2 kA,几何平均峰值电流强度为

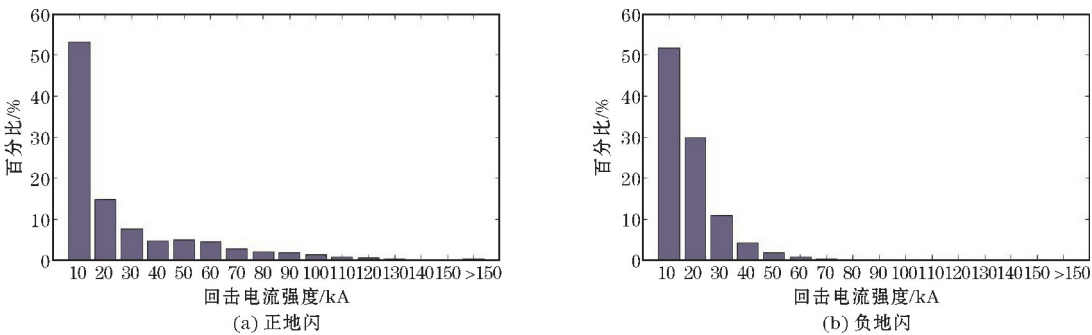


图 8 地闪继后回击峰值电流强度统计图

在一次地闪放电过程中,通常认为首次回击是地闪放电过程中强度最强的一次回击。将继后回击幅值与首次回击幅值进行对比,可以比较各继后回击相对于首次回击的相对强度。对地闪资料的首次回击和继后回击峰值电流强度进行统计分析,发现有 37.5% 多回击地闪至少有一次继后回击峰值电流强度大于首次回击峰值电流强度。同时也发现 BLNet 监测的地闪继后回击峰值电流强度大于首次回击峰值电流强度的继后回击数占总的继后回击数的 24.7%。这些研究说明,的确有一些继后回击要比首次回击强,因此在闪电防护设计中继后回击也是需要考虑的。不同学者利用不同资料对多回击地闪继后回击峰值大于首次回击峰值的统计如表 2 所示,文中得到的结果介于郅秀书^[15]和王俊芳等^[16]分别在甘肃兰州和西藏羊八井地区统计得到的结果之间。

表 2 利用不同资料对多回击地闪继后回击峰值电流强度大于首次回击峰值电流强度的统计表			
文献类型	地点	资料	多回击地闪继后回击峰值大于首次回击峰值的比例/%
文中研究	北京	(BLNet) 快电场变化资料	37.5
文献[15]	甘肃兰州	慢天线资料	54
文献[16]	西藏羊八井	快、慢天线资料	84.5

9.6 kA;正地闪继后回击电流强度在 0 ~ 20 kA 的回击最多,约占继后回击总数的 67.9%,正地闪继后回击峰值电流强度在 100 kA 以上的约占总继后回击数的 2.4% 左右,正地闪继后回击峰值电流强度算术平均值为 22.2 kA,峰值电流强度几何平均值为 11.8 kA。

3.3 北京地区的强地闪空间分布

通过上面的分析可知,有些地闪回击的电流峰值可以达到 100 kA 以上,下面给出这些强回击的空间分布。对 2015–2017 年 BLNet 监测的地闪首次回击峰值电流强度大于 100 kA,并且分布在 115.4 °E ~ 117.5 °E,39.4 °N ~ 41.1 °N 闪电定位点,进行 0.1°×0.1°格点化进行分析。图 9 分别给出了正、负地闪首次回击峰值电流绝对值>100 kA 的地闪空间分布图,从图 9 可以发现首次回击峰值电流强度>100 kA 的强度较强的地闪主要以正地闪为主,且正地闪分布范围较广,从图 9(b) 可以看出首次回击强度>100 kA 的负地闪分布上甸子的东北部,密云县的西南部,在房山地区的中部存在峰值电流大于 100 kA 的负地闪发生频次的大值区,负地闪发生频次的最大值为 6 次;和负地闪相对比,从图 9(a) 可以看出正地闪的分布比较广泛,在北京城区的东北部的密云,平谷上甸子一带有发生,在北京与河北香河交界地闪存在正地闪发生频次的大值,其最大值达 6 次,在北京城区西北部的延庆,西部的古将,西南部的石景山和发生地闪也都有峰值电流强度大于 100 kA 的正地闪发生,在城区也有少量的地闪发生。

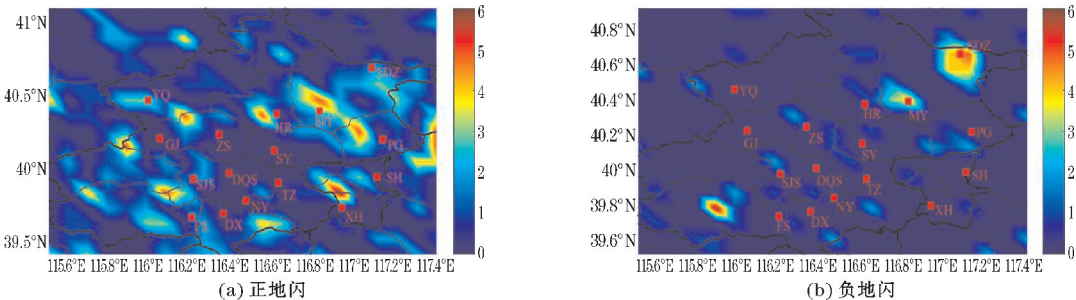


图 9 地闪首次回击峰值电流大于 100 kA 的闪电空间分布图

4 结束语

北京闪电探测和定位网 BLNet 能够对发生于北京及周边地区的雷暴天气过程进行实时闪电定位。主要利用 BLNet 在 2015–2017 年探测到的闪电快电场变化资料,在对闪电放电产生的电磁场变化进行准确测量的基础上,对闪电放电通道中的峰值电流强度进行反演,并在此基础上研究北京地区的正、负地闪的回击强度特征,得到以下结论:

(1) 北京地区的地闪约占总闪的 25.1%,其中正地闪约占总地闪的 21.1%。20:00–23:00 是北京地区闪电发生频次最高的一个时间段,此间无论是总闪还是地闪发生频次,均为最高。

(2) 对北京地区地闪回击特征进行分析,发现 69.6% 正地闪仅有首次回击,正地闪的最大回击次数为 11 次,正地闪平均回击次数为 1.8 次;有 63.9% 的负地闪仅包含首次回击,负地闪的最大回击次数为 25 次,平均回击次数为 2.3 次。

(3) 正地闪回击峰值电流强度算术平均值为 25.2 kA,几何平均值为 15.2 kA,负地闪回击峰值电流强度算术平均值为 14.2 kA,几何平均值为 9.9 kA;正、负地闪首次回击峰值电流强度算术平均值为 17.6 kA,几何平均值为 13.2 kA,正地闪首次回击峰值电流强度算术平均值为 27.0 kA,几何平均值为 17.7 kA,负地闪首次回击峰值电流强度算术平均值为 15.1 kA,几何平均值为 12.2 kA;正地闪继后回击峰值电流强度算术平均值为 22.2 kA,几何平均值为 11.8 kA,负地闪继后回击峰值电流强度算术平均值为 13.2 kA,几何平均值为 9.6 kA;首次回击峰值电流强度大于 100 kA 的地闪主要发生北京东部、东北部、西部、北部的山区以及城区。

(4) 对地闪资料的首次回击和继后回击峰值电流强度进行统计分析,发现有 37.5% 的多回击地闪至少有一次继后回击峰值电流强度大于首次回击峰值电流强度,同时也发现 BLNet 监测的地闪继后回击峰值电流强度大于首次回击峰值电流强度的继后回击数占总的继后回击数的 24.7%。

致谢:感谢成都信息工程大学气象科普基地示范项目(2017KZ0015);成都市科技惠民项目(2016-HM01-00038-SF)对本文的资助

参考文献:

[1] Romero C, Rachidi F, Paolone M, et al. Statistical Distributions of Lightning Currents Associated With Upward Negative Flashes Based on the Data

Collected at the Sântis (EMC) Tower in 2010 and 2011[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1804–1812.

- [2] Cummins K L, Cramer J A, Biagi C J, et al. 6. 1 THE US NATIONAL LIGHTNING DETECTION NETWORK: POST-UPGRADE STATUS[J]. 2006, (1).
- [3] Orville R E, Huffines G R, Burrows W R, et al. The North American lightning detection network (NALDN)—Analysis of flash data: 2001–09[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(5):1305–1322.
- [4] Antonescu B, Burcea S. A cloud-to-ground lightning climatology for Romania[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(2):579–591.
- [5] 郗秀书, 郭昌明, 刘欣生. 北京与兰州地区的地闪特征[J]. 高原气象, 1990, 9(4):388–394.
- [6] 李京校, 郭凤霞, 沈永海, 等. 利用 SAFIR 资料对北京及其周边地区地闪参数的特征分析[J]. 高原气象, 2013(5):1450–1459.
- [7] 李如箭, 逯曦, 张华明, 等. 2008–2010 年北京地区云地闪时空分布特征[J]. 气象与环境科学, 2013(2):52–56.
- [8] 张阳, 张义军, 孟青, 等. 北京地区正地闪时间分布及波形特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4):442–449.
- [9] 武智君, 郗秀书, 王东方, 等. 北京地区负地闪回击转移的电荷量[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(3):247–257.
- [10] 黎勋, 郗秀书, 刘昆, 等. 基于高时间分辨率快电场变化资料的北京地区地闪回击统计特征[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(2):231–241.
- [11] 王宇, 郗秀书, 王东方, 等. 北京闪电综合探测网(BLNET):网络构成与初步定位结果[J]. 大气科学, 2015, 39(3):571–582.
- [12] Yu Wang, Xiushu Qie, Dongfang Wang, et al. Beijing Lightning Network (BLNET): A research and operational system for comprehensive lightning detection[J]. Atmos. Res., 2016, 171:121–132.
- [13] Srivastava A, Y Tian, X Qie, et al. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing[J]. Atmos. Res. Atmospheric Research, 2017, 197:76–83.
- [14] Uman M A, McLain D K. Lightning return stroke

current from magnetic and radiation field measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 1970,75(27):5143–5147.

[15] 郝秀书,余晔,王怀斌,等. 中国内陆高原地闪特征

的统计分析[J]. 高原气象,2001(4):395–401.

[16] 王俊芳,曹冬杰,卢红,等. 西藏羊八井地区的闪电活动特征[J]. 高原气象,2011,30(3):831–836.

The Distribution Characteristics and Return Stroke Peak Current of CG Lightning in Beijing Regions

ZHANG Yuan-long^{1,2}, ZHOU Yun-jun^{1,3}, WANG Dong-fang⁴, TIAN Ye⁴, YUAN Shan-feng⁴

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information & Technology, Chengdu 610225, China; 2. Liaoning Province Meteorological Information Center, Shenyang, 100166, China; 3. State Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO) Institute of Atmospheric Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Research on lightning detection in Beijing regions, analysis of lightning intensity and spatial and temporal distribution characteristics, it not only can understand the activity laws of lightning in Beijing regions, but also provide practical reference value for lightning protection in key area. The paper using the data of lightning fast electric field change collected by Beijing lightning network (BLNet) in Beijing regions during 2015–2017, based on transmission line mode to estimate lightning current, and analyze the distribution characteristics and return stroke peak current of CG lightning in Beijing regions. Analysis results indicate that 20:00–23:00 was the highest frequency of lightning occurrence in Beijing regions, the CG lightning was about 25.1% of the total lightning, and the positive CG lightning was about 21.1% of the total CG lightning. The positive CG lightning return-stroke average peak current intensity arithmetic mean was 25.2 kA, geometric mean was 15.2 kA, and the negative CG lightning return-stroke average peak current intensity arithmetic mean was 14.2 kA, geometric mean was 9.6 kA, and the CG lightning average peak current absolute value arithmetic mean was 17.6 kA, geometric mean was 13.2 kA; the positive CG lightning first return-stroke average peak current intensity arithmetic mean value was 27.0 kA, geometric mean was 17.7 kA, the negative CG lightning first return-stroke average peak current intensity arithmetic mean value was 15.1 kA, geometric mean was 12.2 kA; and the positive CG subsequent return-stroke average peak current intensity arithmetic mean value was 22.2 kA, geometric mean was 11.8 kA; and the negative CG subsequent return-stroke average peak current intensity arithmetic mean value was 13.2 kA, and geometric mean was 9.6 kA; analyzed the CG lightning peak current characteristics of the first return stroke and subsequent return stroke, found that the return stroke peak current of 37.5% multiple return stroke CG lightning at least one subsequent return peak current intensity is greater than the first return stroke, at the same time, it is also found the number of subsequent return stroke CG lightning peak current intensity is greater than first return stroke was about 24.7% of the total number of CG lightning return stroke. The stronger CG lightning, that lightning peak current intensity in the range of >100 kA, it is mainly distributed in the mountains of eastern, northeast, western and northern of Beijing and urban area.

Keywords: synoptic meteorology; thunderstorm; Beijing regions; CG lightning; return stroke; peak current